



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

REBECA CASIMIRO DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES COM
MEMÓRIA DE FORMA

João Pessoa

2018

REBECA CASIMIRO DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES COM
MEMÓRIA DE FORMA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia – CT da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito para obtenção do Título de Bacharel.

Professor orientador: Cícero da Rocha Souto

João Pessoa

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me guiar e ajudar em todos os momentos de minha vida.

À minha família, por terem se dedicado à minha formação e por terem me dado tanto amor durante todos esses anos.

Ao meu orientador e aos meus colegas de laboratório.

Ao namorado e amigos, que me ajudaram e me apoiaram durante todo o período da graduação.

RESUMO

As ligas com memória de forma vêm sendo utilizadas nas mais diversas áreas, em diferentes funções e sob diferentes formas. Para a correta aplicação dessas ligas é de extrema importância, fazer a caracterização das mesmas, a fim de evitar o mau funcionamento do dispositivo em questão. Baseado nesta necessidade, foi realizada a caracterização em amostras de liga com memória de forma (LMF) em forma de micromola, para obter os parâmetros deste tipo de liga; as mesmas experimentam excitações termoeletricas diferentes, além de uma revisão bibliográfica acerca das LMF e seus efeitos. Neste trabalho foi apresentado, uma noção conceitual acerca dos instrumentos utilizados para realização desta caracterização. Foi aplicado na amostra o efeito memória de forma, em três níveis de corrente elétrica e em seis estados de alongação, variando o comprimento da mola de 50 % a 300 %. Constatou-se que, o alongamento aplicado a amostra é afetado de diversas maneiras nas características da mola; quanto maior o alongamento sofrido pela amostra, maior a força residual, e menor a temperatura mesmo sob excitação de correntes altas, pois, há o efeito de convecção natural com o meio. Foi aplicado na amostra uma corrente máxima de 351 mA, na qual, a amostra chegou a exercer uma variação de força de 2,4 N sob um alongamento de 22,5 mm, e uma temperatura de 107,9 °C sob um alongamento de 13,5 mm. Notou-se que existe uma alongamento ótima de 150 %, na qual a micromola experimenta a maior variação de força, sob os diferentes níveis de corrente.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma. Micromola. Atuadores termomecânicos.

ABSTRACT

Foi aplicado na amostra o efeito memória de forma, em três níveis de corrente elétrica e em seis estados de alongação, variando o comprimento da mola de 50 % a 300 %. Constatou-se que, o alongamento aplicado a amostra é afetado de diversas maneiras nas características da mola; quanto maior o alongamento sofrido pela amostra, maior a força residual, e menor a temperatura mesmo sob excitação de correntes altas, pois, há o efeito de convecção natural com o meio. Foi aplicado na amostra uma corrente máxima de 351 mA, na qual, a amostra chegou a exercer uma variação de força de 2,4 N sob alongamento de 22,5 mm, e uma temperatura de 107,9 °C sob alongamento de 13,5 mm. Notou-se que existe um alongamento ótima de 150 %, na qual a micro mola experimenta a maior variação de força, sob os diferentes níveis de corrente.

The shape memory alloys have been used in such different work areas, in different functions and in different shapes. For their application, it is extremely important to perform a characterization of them. Based on these facts, it has been done a characterization in shape memory alloys (SMA) samples, in shape of micro-springs, in order to extract the parameters of the SMAs supported in different thermoelectric excitation. In addition to the theoretical background for the SMA, a conceptual notion about the instruments used to carry out this characterization was set. The shape memory effect was imposed in the samples, in three different levels of electric current, and in six stages of length of 50 % to 300 % were presented. It has been found that the applied elongation is a variable of several forms in the characteristics of the spring. The higher the intensity of the sample, the higher the residual strength, the lower the temperature with high excitation, but there is a natural convection effect with the means. It was added as a maximum force influence of 351 mA, while a force measurement of 2.4 N was 22.5 mm, and a temperature of 107.9 °C under the deformation of 13.5 mm. Note that there is a greater capacity of 150 %, in which a greater range of force, no matter which of the three currents employed.

Keywords: Alloys with shape memory. Micro-springs. Thermomechanical actuators.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DEFORMAÇÃO EM UM CLIPE DE PAPEL DE LMF	5
FIGURA 2 - TRANSFORMAÇÕES DE FASE DE UMA LMF	8
FIGURA 3 - ARRANJOS ATÔMICO DE UMA LMF	9
FIGURA 4- MICROMOLA ORTODÔNTICA UTILIZADA NESTE TRABALHO	10
FIGURA 5 - DESENHO ESQUEMÁTICO EM 3D GERADO NO SOFTWARE INVENTOR.....	11
FIGURA 6- A AMOSTRA FIXADA NO SUPORTE DE AMOSTRAS	12
FIGURA 7 - ESQUEMA DA CÉLULA DE CARGA UTILIZADA NESTE TRABALHO	13
FIGURA 8- FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DA BANCADA DE TESTES.....	14
FIGURA 9 - TELA DO PROGRAMA NO SOFTWARE LABVIEW	15
FIGURA 10 - TEMPERATURA X TEMPO SOB 196 MA	18
FIGURA 11 - GRÁFICO FORÇA X TEMPO SOB 196 MA.....	18
FIGURA 12 - GRÁFICO FORÇA X TEMPERATURA SOB EXCITAÇÃO DE 194 MA EM 13,5 MM DE COMPRIMENTO.....	20
FIGURA 13 - GRÁFICO TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO PARA 276MA	21
FIGURA 14 - GRÁFICO FORÇA X TEMPO SOB 276MA	22
FIGURA 15 - GRÁFICO FORÇA VERSUS TEMPERATURA A 50 % DE ELONGAÇÃO.....	23
FIGURA 16 - GRÁFICO FORÇA VERSUS TEMPERATURA A 150 % DE ELONGAÇÃO.....	23
FIGURA 17- COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO	24
FIGURA 18 - GRÁFICO DE FORÇA AO LONGO DO TEMPO SOB 351 MA	25
FIGURA 19 - GRÁFICO FORÇA VERSUS TEMPERATURA SOB ELONGAÇÃO DE 50 %	26
FIGURA 20 - GRÁFICO FORÇA VERSUS TEMPERATURA SOB ELONGAÇÃO DE 150%	26
FIGURA 21 - GRÁFICO FORÇA X ELONGAÇÃO SOB OS DIFERENTES NÍVEIS DE EXCITAÇÃO ELÉTRICA	27

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CORRESPONDÊNCIA DA ELONGAÇÃO DE PORCENTAGEM EM MILÍMETROS.....	11
TABELA 2 - PARÂMETROS PARA CONFIGURAÇÃO DA ONDA QUADRADA	17
TABELA 3 - VALORES DE FORÇA E TEMPERATURA RELACIONADOS AO ALONGAMENTO DE MOLA ...	19
TABELA 4 - PARÂMETROS DA ONDA QUADRADA PARA 273 mA.....	20
TABELA 5 - DADOS DE FORÇA E TEMPERATURA RELACIONADOS À DISTÂNCIA ENTRE OS OLHAIS ...	22
TABELA 6 - PARÂMETROS PARA A EXCITAÇÃO EM FORMA DE ONDA QUADRADA.....	24
TABELA 7 - DADOS RELACIONANDO FORÇA, TEMPERATURA E ALONGAMENTO DA MOLA DE LMF .	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
1.1. MOTIVAÇÃO	5
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivos gerais	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	6
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	7
2.2. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA.....	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1. A AMOSTRA.....	10
3.2. ESTRUTURA DE TESTES	11
3.3. INSTRUMENTAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	12
3.3.1. Célula de carga.....	13
3.4. CONDICIONAMENTO DE SINAIS E PROGRAMAÇÃO	14
4. RESULTADOS E DISCURSÕES	17
4.1. ENSAIOS A BAIXO NÍVEL DE CORRENTE	17
4.1.1. Temperatura	17
4.1.2. Força	18
4.1.3. Força x Temperatura	19
4.2. ENSAIOS EM NÍVEL MÉDIO DE CORRENTE.....	20
4.2.1. Temperatura	21
4.2.2. Força	21
4.2.3. Força versus Temperatura.....	22
4.3. ENSAIOS EM ALTO NÍVEL DE CORRENTE	23
4.3.1. Temperatura	24
4.3.2. Força	24
4.3.3. Força versus Temperatura.....	25

4.4. Força versus Elongação	26
5. CONCLUSÕES	28
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Materiais ditos inteligentes possuem propriedades únicas, e uma ou mais dessas propriedades podem ser alteradas de forma controlada através de estímulos externos, como tensão mecânica, temperatura, eletricidade, campos magnéticos, etc. Um exemplo, são as ligas com memória de forma, também conhecidas como LMF.

Diferentemente das ligas comuns, ao sofrer uma deformação plástica, uma LMF pode recuperar sua forma através de um aquecimento adequado. Ou seja, se um clipe metálico de LMF, vide Figura 1, fosse deformado, seria possível recuperar sua forma original de clipe, se o mesmo fosse mergulhado em um recipiente com água quente. Em 1932, um químico sueco chamado Arne Ölander, foi o primeiro a descobrir este efeito em uma liga de Au-Cd (ÖLANDER, 1932). Desde então foram descobertas diversas ligas que possuem o mesmo efeito, dentre elas, ligas com zinco, cobre, níquel e titânio.

Figura 1 - Deformação em um clipe de papel de LMF



Fonte: Autoria Própria

Em meio à variedade de ligas com este efeito, vários estudos foram conduzidos a fim de estudar melhor o efeito memória de forma. Este fenômeno ocorre devido a transformação de fase sob determinada temperatura e tensão. Assim, pode-se aplicar as LMF como sensores e atuadores em diversas áreas, tais como odontológica, automotiva, robótica e aeronáutica.

Sensores e atuadores são também utilizados em versões em dimensões menores, chamados de microatuadores e microsensores. Caracterizar esses materiais, requer um pouco mais de cuidado pois são necessários equipamentos com alta precisão para obter os parâmetros corretamente. Por isto, neste trabalho deseja-se investigar e elucidar, as características de microatuadores com memória de forma e geometria helicoidal.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos gerais

- Pesquisa bibliográfica acerca dos materiais com memória de forma.
- Realizar estudos acerca da caracterização em microatuadores de LMF.
- Desenvolver uma estrutura para prospectar dados e informações das propriedades do material e analisar os resultados.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudar atuadores com geometria helicoidal.
- Provocar o efeito memória de forma sob diferentes estímulos.
- Analisar os resultados obtidos através dos ensaios.

1.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para realizar este trabalho, a metodologia utilizada foi de pesquisa aplicada, onde os conhecimentos na área de materiais com memória de forma, ensaios mecânicos, instrumentação e programação foram aplicados para a realização dos experimentos. A revisão bibliográfica foi realizada durante todo o período da pesquisa, mas principalmente antes de iniciar o trabalho, para ter uma noção do estado da arte. Em seguida, foi pensada e elaborada uma bancada de teste para coletar informações da micromola de LMF.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos. Iniciando o trabalho com a fundamentação teórica, onde se detalha os principais temas e publicações que este trabalho envolve. Os materiais e métodos utilizados vêm descritos no capítulo dois, onde fala-se sobre a concepção, instrumentação e acionamento da estrutura utilizada para realização dos testes, a geometria das amostras e por fim, caracterização do microatuadores. No capítulo seguinte têm-se os resultados obtidos das caracterizações e discursão dos pontos relevantes. No quarto e último capítulo são apresentados comentários e conclusões finais, além de propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará alguns aspectos relacionados a este trabalho, de forma detalhada, a fim de melhorar o entendimento sobre ligas com memória de forma, suas fases e seus mecanismos de transformação de fase.

2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Shape memory alloys (SMA), do inglês pode ser traduzido como ligas com memória de forma, LMF. Essas ligas fazem parte dos materiais que conseguem recuperar sua forma previamente estabelecida, após serem termicamente ou mecanicamente induzida. Apesar de terem sido descobertas no início da década de trinta, essas ligas somente foram estudadas mais a fundo a partir da descoberta do Nitinol. Este nome foi dado a liga pela junção de “NiTi”, referente a composição da liga que é feita de níquel e titânio, e “nol” são as iniciais do laboratório em que foi descoberto, em inglês Naval Ordnance Laboratory (LAGOUDAS, 2008).

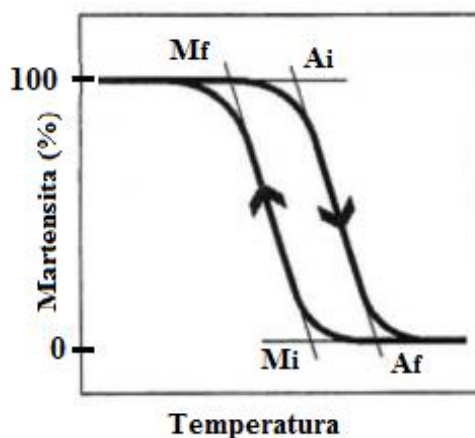
Vários estudos foram conduzidos a respeito dos tratamentos térmicos, as possíveis composições, microestrutura relacionada a cada fase e os efeitos relativos à essas fases. Tendo o conhecimento em mãos, as LMF começaram a ser largamente utilizadas como sensores e atuadores (LAGOUDAS e HARTI, 2007). É sabido que os sensores recebem um estímulo físico, e transformam o mesmo em um estímulo não físico. Usualmente os sensores de LMF recebem um estímulo térmico, e este é transformado em sinal elétrico. Já os atuadores fazem o trabalho inverso, ou seja, recebem um estímulo elétrico, e transformam em um estímulo mecânico. Portanto, sensores e atuadores de LMF substituíram os atuadores e sensores tradicionais que eram muito volumosos e complexos por peças simples e leves (COURA, 2016) em diversas áreas como aeronáutica (LAGOUDAS e HARTI, 2007), automobilística (STOECKEL, 1990), medicina (NIEMEYER, T.TUNGA, *et al.*, 2008) e etc.

Nitinol, também chamada de NiTi, é o tipo de LMF mais popular devido as suas propriedades mecânicas, biocompatibilidade, baixo peso específico e boa resistência a corrosão (MANTOVANI, 2000) (MACHADO e SAVI, 2003). Adicionar outros elementos neste tipo de liga também é válido a fim de realçar uma determinada característica, como por exemplo, adicionar cobre numa liga NiTi, melhora sua resistência a fadiga (MIYAZAKI S, 1999).

A transformação de fase em uma LMF ocorre ainda no estado sólido, estas transformações, são denominadas martensíticas e austeníticas. São chamadas assim, pois, essas ligas têm duas fases, martensita e austenita. A martensita é uma fase estável a temperaturas baixas e facilmente deformável, logo, uma LMF a temperatura ambiente é bastante flexível, e isto ocorre devido a sua estrutura cristalina na qual é pouco simétrica, podendo ser monoclínica, ortorrômbica ou tetraédrica, dependendo do elemento químico utilizado na liga (RAO, ASHWIN, *et al.*, 2015).

Essas transformações de fase estão associadas a temperaturas características definidas, vide Figura 2. No aquecimento, a transformação austenítica começa em Austenita inicial (Ai) e ao atingir Austenita final (Af), a liga está completamente em fase austenítica. No resfriamento, a liga apresenta somente fase austenita e ao atingir a temperatura Martensita inicial (Mi), dá-se início a formação martensítica, chegando a 100% de fase martensita quando a amostra atinge a temperatura Martensita final (Mf) (SALEHI, HAMED, *et al.*, 2014).

Figura 2 - Transformações de fase de uma LMF

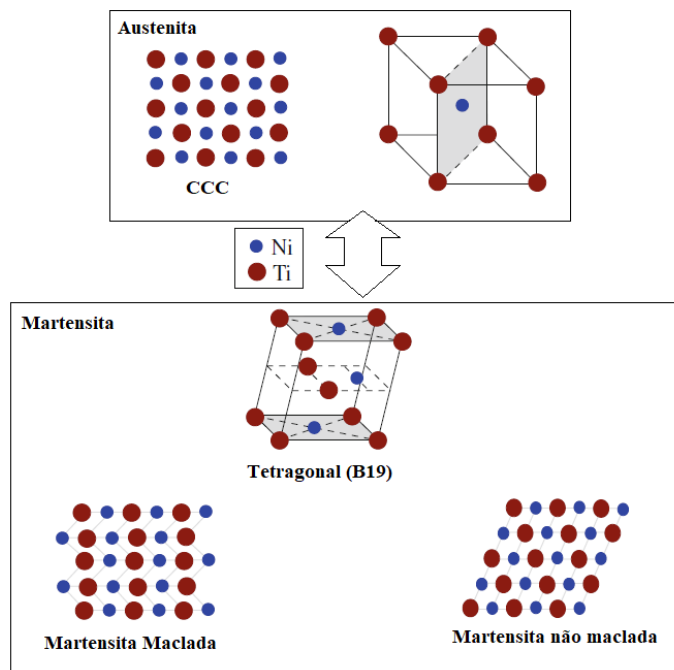


Fonte: Adaptado Stoeckel (2000)

Uma liga LMF ao ser aquecida, sofre transformação, denominada transformação direta, da fase martensita para austenita, sendo esta fase de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), como podemos observar na Figura 3. Esta fase é mais organizada, e deste modo, mais dura que a fase martensita. Pode ocorrer também a transformação inversa, da fase martensita para a austenita, e esta transformação é responsável pela propriedade única da LMF. Quando há resfriamento sem aplicação de carga, o material assume a fase martensita maclada (martensita simétrica), mas se a

transformação martensítica ocorrer com diminuição da temperatura e aplicação de carga, o material passa a ser martensita não maclada, e esta, possui apenas uma variação (STOECKEL, 2000).

Figura 3 - Arranjos Atômico de uma LMF



Fonte: Adaptado Rao (2015)

2.2. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Sob o entendimento das transformações de fase explicadas acima, podemos entender melhor os mecanismos pseudoplásticos exibido pelas LMF, denominada efeito de memória de forma (EMF).

O EMF é observado quando uma amostra já experimentou uma deformação sob tensão, e mesmo ao aliviar a tensão a amostra exibe uma deformação residual. Ao aquecer a amostra a uma temperatura acima de Austenita final, A_f , o material sofre uma transformação austenítica e recupera a forma anterior a deformação, que se chamam de deformação pseudoplástica. Ao se resfriar a amostra novamente, e a liga atingir uma temperatura abaixo de Martensita final, M_f , o material estará completamente em sua fase martensita, e consequentemente a ocorrerá uma transformação direta, sem a ocorrência de deformação. Vale lembrar, que neste processo a liga passa por uma mudança em sua rede cristalográfica, mas não ocorre qualquer deformação macroscópica, permanecendo a amostra em sua forma original (RAO, ASHWIN, *et al.*, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos adotados para caracterizar as amostras com memória de forma, estão descritos nos tópicos seguintes. Todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Controle – LINC, estabelecido na Universidade Federal da Paraíba. Neste capítulo são abordados os temas relativos as micromolas de LMF, estrutura utilizada para realização da caracterização, bem como os equipamentos auxiliares para a instrumentação.

3.1. A AMOSTRA

As ligas com memória de forma são largamente utilizadas como atuadores sob as mais variadas formas (SILVA, F, *et al.*, 2017). Desta maneira, é importante ter conhecimento acerca das principais características desses materiais, a fim de garantir uma melhor aplicabilidade. Por este motivo, o presente estudo desenvolveu-se uma metodologia para caracterização eletromecânica de microamostras em forma de mola, vide Figura 4. Esta geometria foi escolhida devido a sua capacidade de alongamento em comparação com outras geometrias, como é no caso do fio, no qual só permite uma deformação de 8 % de seu comprimento inicial. As micromolas utilizadas neste trabalho, são largamente utilizadas no ramo odontológico, e são fornecidas pela Morelli Ortodontia, confeccionados em fios de NiTi de 0,2 mm de diâmetro, formando uma mola de 1,27 mm de diâmetro externo, e comprimento entre os olhais de 9 mm.

Figura 4- Micromola ortodôntica utilizada neste trabalho



Fonte: Adaptado EMILAVACA (2016)

Os testes foram realizados com a mola esticada em até 300 % do seu comprimento inicial, a fim de quantificar a força que a amostra seria capaz de exercer sob diferentes estímulos térmicos. Na Tabela 1 detalha-se os seis níveis de alongação aplicadas a mola e sua correspondência em termos de alongação.

Tabela 1 - Correspondência da alongação de porcentagem em milímetros

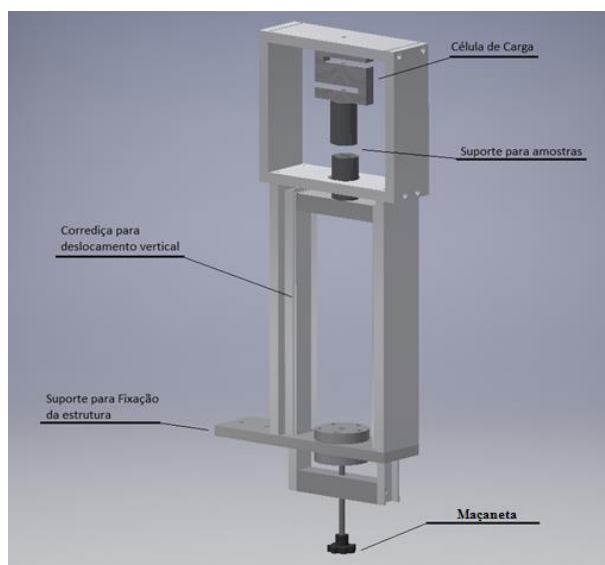
Alongamento (%)	Distância entre os olhais (mm)
0	9
50	13,5
100	18
150	22,5
200	27
250	31,5
300	36

Fonte: Autoria Própria

3.2. ESTRUTURA DE TESTES

Caracterizar amostras muito pequenas é um desafio, devido a isso, foram analisadas maneiras de obter essas informações, através de um ensaio semelhante ao de tração convencional. Para isso, foi desenvolvido uma estrutura no software Inventor 2016, e após alguns ajustes, uma estrutura vertical foi confeccionada e fixada na mesa com o auxílio de um sargento. Esta estrutura tem sua base inferior móvel, para ajustes de alongamento na mola, como apresentado na figura a seguir.

Figura 5 - Desenho esquemático em 3D gerado no software Inventor



Fonte: Autoria Própria

Na parte superior da estrutura da Figura 5, pode-se visualizar a célula de carga, que tem como função ler as informações das amostras em termos de força mecânica e transforma-las em tensão elétrica. Esta estrutura tem como principal função fixar as amostras no suporte de amostras, vide Figura 6, e com o auxílio da maçaneta alongar manualmente a amostra, a partir de 50 % e chegando até 300 %. A cada passo, é induzido um aquecimento na mola através do efeito joule, provocado pela aplicação de uma corrente elétrica através de sinais de onda quadrada gerada pela rotina do LabView, gerando força através da transformação austenítica que é lida pela célula de carga. Três diferentes amplitudes de correntes foram aplicadas ao material, sob os diferentes comprimentos citadas acima.

Figura 6- A amostra fixada no suporte de amostras



Fonte: Autoria Própria

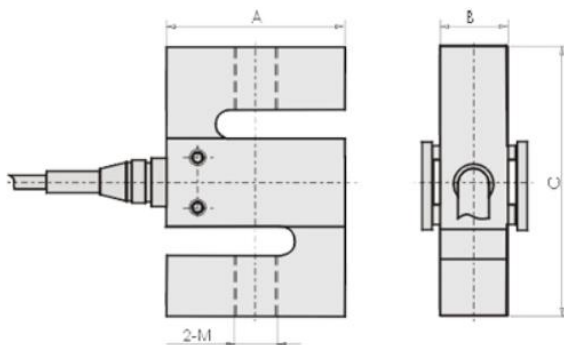
3.3. INSTRUMENTAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A caracterização das amostras foi realizada na bancada de testes montada especificamente para esta finalidade. A bancada foi composta por uma estrutura vertical, na qual acomodava uma célula de carga para medição de força, placas de circuito de controle de tensão e corrente, e interface NI CompactDAQ, que foram utilizados para enviar os sinais de tensão, corrente e temperatura através do programa elaborado na plataforma do LabView.

3.3.1. Célula de carga

Na Figura 6, pode-se notar que a estrutura possui uma célula de carga, sendo esta, um transdutor de força, ou seja, transforma uma grandeza física, que no caso é força mecânica, em sinal elétrico. Foi utilizado uma célula do tipo S, modelo SCSA/ZL-5 com capacidade de 5 Kgf e alimentação de 10 V, sendo ideal para medir forças de tração e/ou compressão. Essa transformação é realizada através de extensômetros acoplados na própria estrutura metálica, sendo estas, muito sensíveis à carga aplicada, dessarte, a deformação mecânica altera a resistência elétrica dos medidores de forma proporcional à carga.

Figura 7 - Esquema da célula de carga utilizada neste trabalho



Fonte: (MK CONTROLE, 2018)

A fim de fazer medições com a célula, é necessário que seja realizado um correto condicionamento de sinais, para isso, foi utilizado uma fonte de tensão constante para alimentar a célula. A saída da célula de carga é relativamente pequena, e por este motivo, foi utilizado um amplificador de tensão com o intuito de elevar o nível do sinal e assim aumentar a resolução da medição. Ao instalar a célula, é necessário que sejam tomados alguns cuidados, pois muito provavelmente, ela não apresentará tensão de saída igual a zero volts. Mesmo sem a presença de deformação, é necessário a calibragem da célula para um valor de tensão igual a 0 V, por este motivo, na mesma placa do amplificador, foi incorporado um potenciômetro para ajustar a saída de tensão a 0 V, e outro também foi instalado para aumentar o ganho da tensão e melhorar a leitura das medições.

Para garantir que a célula funcione adequadamente, foi realizado um processo de calibragem com pesos conhecidos, e os resultados de tensão elétrica foram coletados através de programa

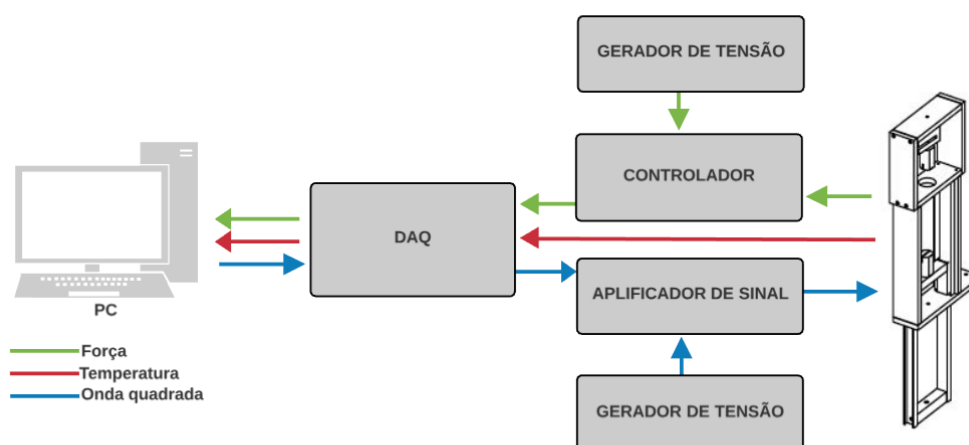
desenvolvido no software LabView. Destes valores, foi retirada uma equação da reta, tendo assim, para cada valor de tensão, um valor de força correspondente.

3.4. CONDICIONAMENTO DE SINAIS E PROGRAMAÇÃO

Foi utilizado um chassi CompactDAQ por USB conectado ao computador, para medição e geração de sinais. Juntamente com o software LabView foi possível gerar sinais de corrente para acionar a mola termicamente e coletar os dados de temperatura e força, na Figura 7 podemos observar um fluxograma do funcionamento da bancada de testes.

O primeiro slot do CompactDAQ foi destinado ao módulo Ni-9213 para leitura de temperatura, com auxílio de um termopar tipo K fixado direto na amostra. Na rotina do programa desenvolvido foram coletados os dados de temperatura em tempo real, em graus Celsius, e após o termino dos ciclos, foram gerados gráficos de temperatura versus tempo.

Figura 8- Fluxograma do funcionamento da bancada de testes

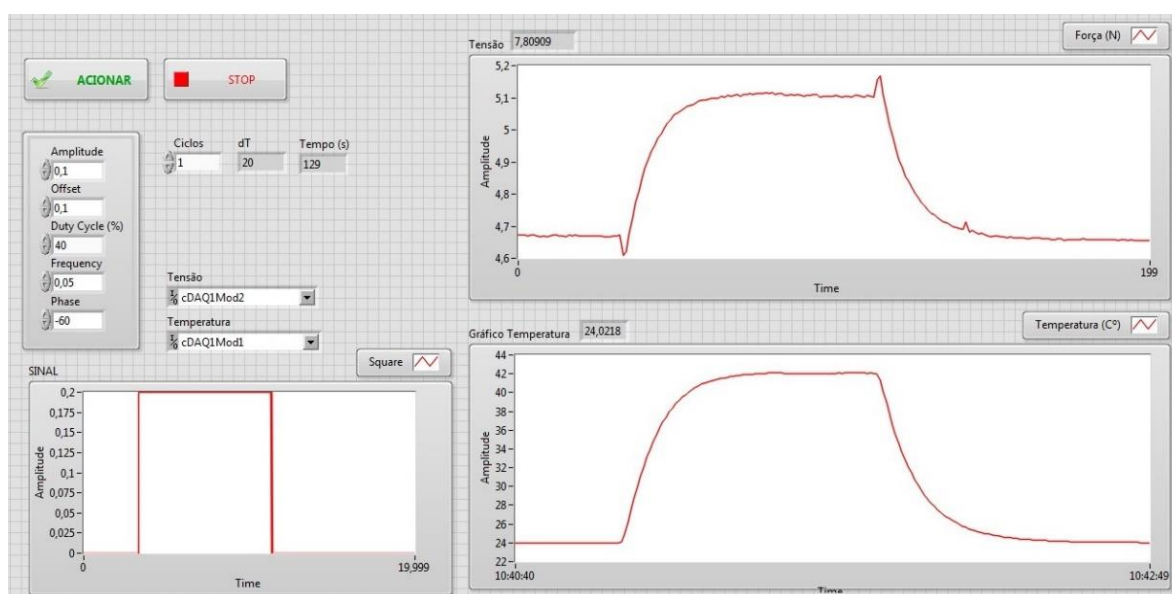


Fonte: Autoria Própria

O módulo NI-9201 foi utilizado para receber os valores de tensão vindos da célula de carga. Através da programação foi possível converter esses valores de tensão, vindos das amostras em unidade de força newton (N). Foi utilizado uma placa de circuito para elevar os valores de tensão, com intuito de obter resultados mais expressivos em termos de tensão elétrica, já que se trata de um microatuador.

Para gerar o efeito joule na amostra, foi gerado um sinal de tensão analógica através do programa, utilizando a placa NI 9263. A rotina foi realizada de modo que, o sinal foi gerado em forma de onda quadrada com amplitude de sinal, frequência, fase, offset e *duty cycle* controlados. Esta placa precisou de um amplificador de corrente, pois ela não consegue fornecer a quantidade de corrente necessária para acionamento da mola. O número de ciclos na qual a amostra permaneceria em excitação, também foi monitorado, para garantir que todas as amostras passassem pelo mesmo número de excitações. Os dados de aquisição do termopar e da célula de carga, foram plotados em tempo real no programa, e guardados em arquivos .txt para futuras manipulações no software Matlab. Na Figura 8, é possível visualizar o *template* do programa em execução.

Figura 9 - Tela do programa no software LabView



Fonte: Autoria Própria

O programa possui dois botões principais, um para iniciar a rotina de simulação, o outro para interromper a rotina a qualquer momento. Para provocar o efeito joule nas micromolas foram gerados sinais de tensão em forma de onda quadrada, variando a amplitude e o offset das ondas, permanecendo constantes os outros parâmetros a fim de manter os resultados uniformes. A amplitude representa o valor máximo negativo e positivo na qual a onda consegue atingir, assim, para que o sinal gerado não emitisse valores negativos, foi necessário configurar um compensador, nomeado de *offset*, para forçar o pico inferior da onda não assumir valores negativos. Ao iniciar o ciclo, o sinal da onda já começava em seu valor máximo de amplitude, por isso, foi necessário

configurar um valor de fase para garantir que, a cada ciclo, a onda gerada comece e termine em valores de tensão mínima, de acordo com as configurações dos outros parâmetros. O gráfico no canto inferior do lado esquerdo representa o sinal da onda quadrada, obtida dos parâmetros predeterminados para aquele ciclo. Em “Ciclos”, pode-se controlar a quantidade de ciclos que o programa iria realizar para encerrar a rotina, sendo que, um ciclo representava exatamente uma forma de onda quadrada. Já os gráficos do lado direito, exibiam em tempo real os valores de força e temperatura, respectivamente, ao longo do tempo.

4. RESULTADOS E DISCURSÕES

A amostra foi deformada em diferentes amplitudes, e em cada uma dessas situações, a amostra foi excitada em três níveis diferentes de corrente. Os resultados referentes aos experimentos, sob diferentes deformações e correntes citadas acima, estão apresentados neste capítulo e conforme as respostas vão sendo apresentadas, as discussões necessárias serão apontadas.

4.1. ENSAIOS A BAIXO NÍVEL DE CORRENTE

Foram aplicados na amostra, em média, uma corrente de 0,194 A em todos os níveis de alongação (50-300 %), graças ao sinal de onda quadrada gerado, de acordo com os parâmetros citados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para configuração da onda quadrada

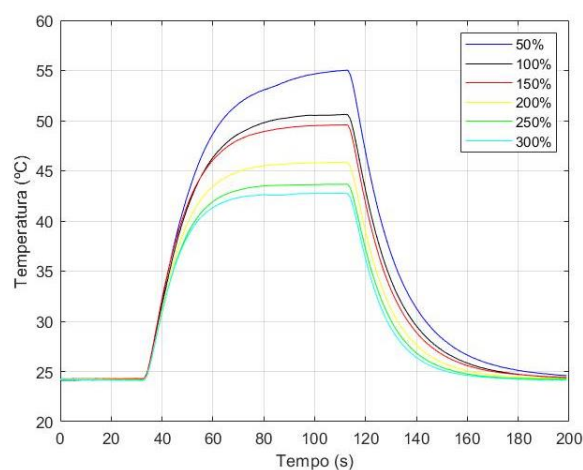
Amplitude (V)	0,1
Offset (V)	0,1
Duty Cycle (%)	40
Frequencia (Hz)	0,05
Fase (Rad)	-60

Fonte: Autoria Própria

4.1.1. Temperatura

Na figura 10 ilustra-se a influência da corrente aplicada no decorrer do tempo. Pode-se observar que sob um alongamento de 50 %, ou seja, a mola com uma alongação de 13,5 mm, a amostra atingiu uma temperatura máxima de 55 °C. Esta temperatura foi diminuindo a cada alongamento da amostra devido ao efeito de convecção natural, sabendo que os experimentos eram realizados a uma temperatura ambiente de 23 °C.

Figura 10 - Temperatura x Tempo sob 196 mA

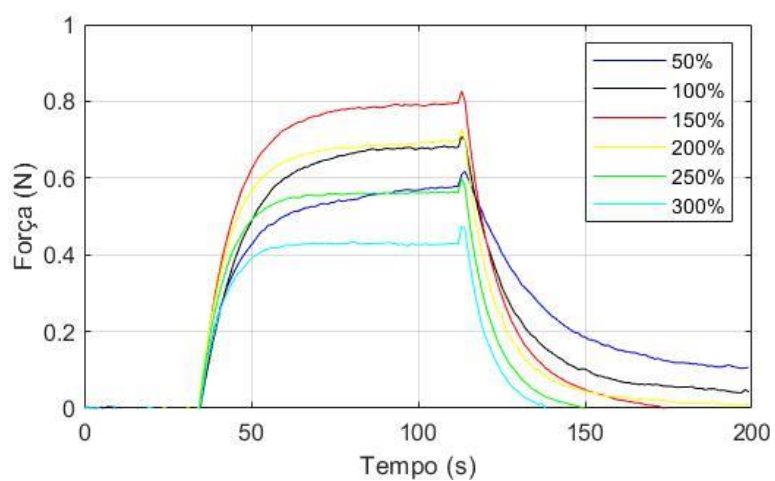


Fonte: Autoria Própria

4.1.2. Força

Os dados de leitura da célula de carga em cada ciclo foram plotados na Figura 10. As informações da célula de carga são traduzidas em termos de força, graças a programação do LabView, e estes dados foram tratados no software Matlab. Na figura 10, pode-se observar o comportamento da mola ao ser aquecida e resfriada, de acordo com a excitação, em forma de onda quadrada, aplicada na mola nos seis diferentes comprimentos.

Figura 11 - Gráfico Força x Tempo sob 196 mA



Fonte: Autoria Própria

Sob o alongamento de 50 %, a micromola obteve 0,55 N de força, e este foi crescendo acompanhando o aumento do comprimento até chegar a 150 %, onde a micromola exerceu um 0,75 N de força máxima. Após um alongamento de 150 % (22,5 mm), sob a mesma corrente, a mola sofreu um decréscimo de força, chegando a 0,43 N sob um alongamento de 36 mm (300 %).

4.1.3. Força x Temperatura

Sabendo que a micromola de LMF é termicamente ativa (RAO, ASHWIN, *et al.*, 2015), uma análise importante é saber como a força se comporta quando a micromola é aquecida e resfriada. Os gráficos a seguir, ilustram a força em N, versus temperatura em graus celsius de acordo com a deformação imposta na mola.

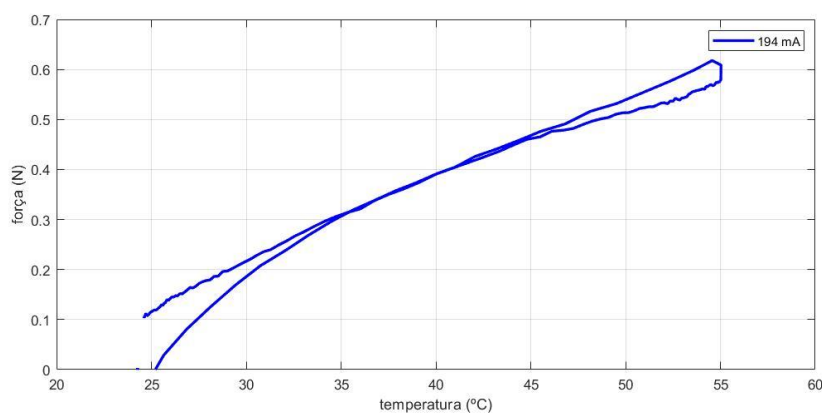
De acordo com a Tabela 3, pode-se observar que a mola chegou a uma temperatura máxima de 55 °C sob um alongamento de 50%, e na Figura 11 vê-se ver o gráfico força versus temperatura. Na figura 12 observa-se os mesmo dados, em seis níveis de elongação de micromola.

Tabela 3 - Valores de força e temperatura relacionados ao alongamento de mola

Distância entre os olhais (%)	Força (N)	Temperatura (°C)
50	0,55	55
100	0,65	50,6
150	0,75	49,6
200	0,7	45,9
250	0,54	43,7
300	0,43	42,8

Fonte: Autoria Própria

Figura 12 - Gráfico Força x Temperatura sob excitação de 194 mA em 13,5 mm de comprimento



Fonte: Autoria Própria

É importante atentar que, como se trata de uma amostra muito pequena, a transferência de calor do ambiente com a micromola acontece de maneira muito rápida, desta maneira, quando a mola é esticada sua área de contato com o ar aumenta, diminuindo a temperatura da micromola, mesmo a amostra estando sob excitação.

4.2. ENSAIOS EM NÍVEL MÉDIO DE CORRENTE

Na segunda etapa dos testes, foi aplicado um nível corrente maior, que chegou em torno de 277 mA. *Duty cycle*, frequência e a fase não foram alterados a fim de manter o mesmo padrão de onda quadrada.

Tabela 4 - Parâmetros da onda quadrada para 273 mA

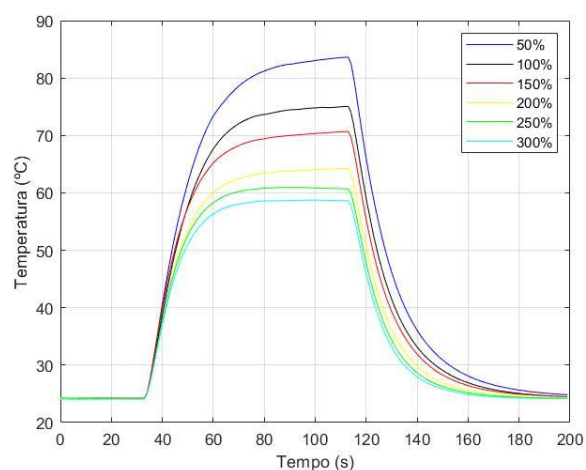
Amplitude (V)	0,133
Offset (V)	0,133
Duty Cycle (%)	40
Frequencia (Hz)	0,05
Fase (Rad)	-60

Fonte: Autoria Própria

4.2.1. Temperatura

A medida que o sinal de corrente era gerado, a amostra era excitada e sua temperatura variava de acordo com a amplitude deste sinal. O gráfico abaixo mostra que a amostra atingiu uma temperatura de 83,6 °C, sob alongamento de 50 % e corrente de 276 mA. Sob a mesma corrente, mas sob alongamento máximo de 300 %, a temperatura máxima da micromola foi de 58,7 °C.

Figura 13 - Gráfico Temperatura ao longo do tempo para 276mA

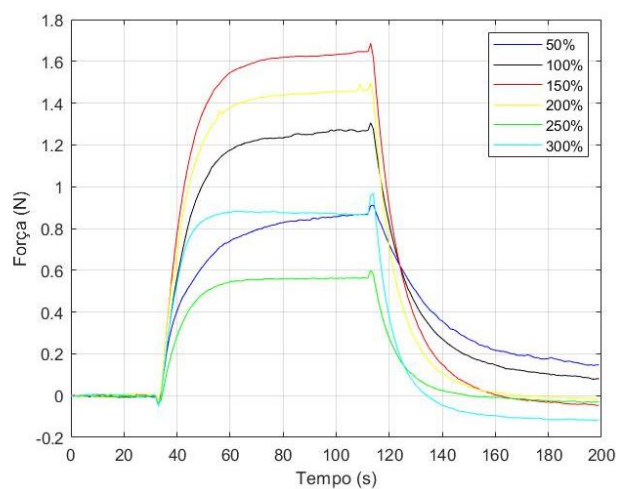


Fonte: Autoria Própria

4.2.2. Força

A figura 14 mostra os dados de força no decorrer do tempo da micromola em seis níveis de alongamento diferentes. A micromola com 13,5 mm, a mesma apresentou uma força de 0,82 N, e este valor de força chegou em seu valor máximo de 1,6 N, seguindo a tendência do primeiro teste, com 196 mA.

Figura 14 - Gráfico Força x Tempo sob 276mA



Fonte: Autoria Própria

4.2.3. Força versus Temperatura

Apesar da mola chegar a uma temperatura maior em 50 % de alongamento, sua maior amplitude de força foi obtida ao ser esticada em 150 %, ambos expostos a mesma corrente. Isso nos mostra que o alongamento da mola tem grande influência na mola, tanto quanto a excitação térmica aplicada na mola.

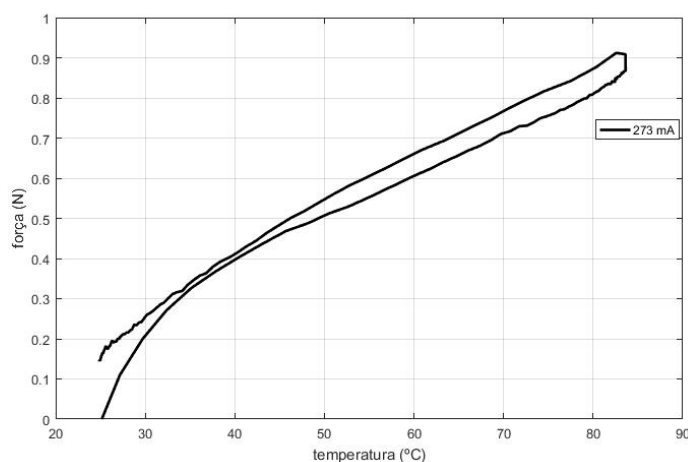
Tabela 5 - Dados de Força e Temperatura relacionados à distância entre os olhais

Distância entre os olhais (%)	Força (N)	Temperatura (°C)
50	0,82	83,6
100	1,2	75
150	1,6	70,7
200	1,45	64,2
250	1,22	61
300	0,87	58,7

Fonte: Autoria Própria

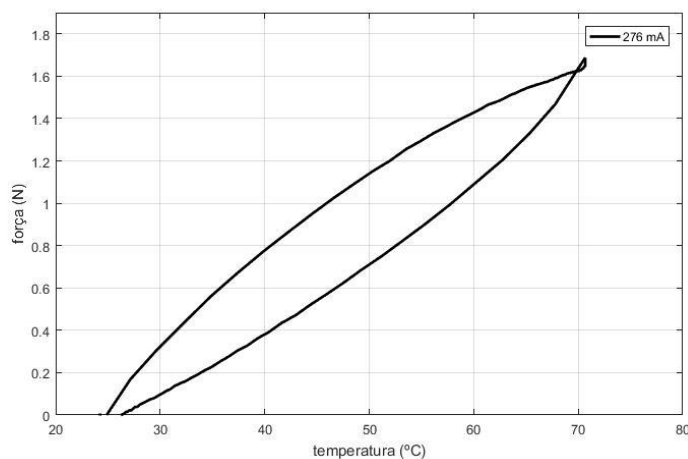
Nas figuras 15 e 16 podemos observar a influência do comprimento em termos de força e temperatura, sob um alongamento de 50% e 150%, respectivamente.

Figura 15 - Gráfico Força versus Temperatura a 50 % de elongação



Fonte: Autoria Própria

Figura 16 - Gráfico Força versus Temperatura a 150 % de elongação



Fonte: Autoria Própria

4.3. ENSAIOS EM ALTO NÍVEL DE CORRENTE

Na última parte dos ensaios foi elevado o nível de tensão para que a corrente chegasse a um valor próximo a 400 mA, e assim garantir que o material permaneça em boas condições de funcionamento. *Duty cycle*, frequência e a fase não foram alterados para manter o mesmo padrão de onda quadrada, e estão expostos na tabela abaixo.

Tabela 6 - Parâmetros para a excitação em forma de onda quadrada

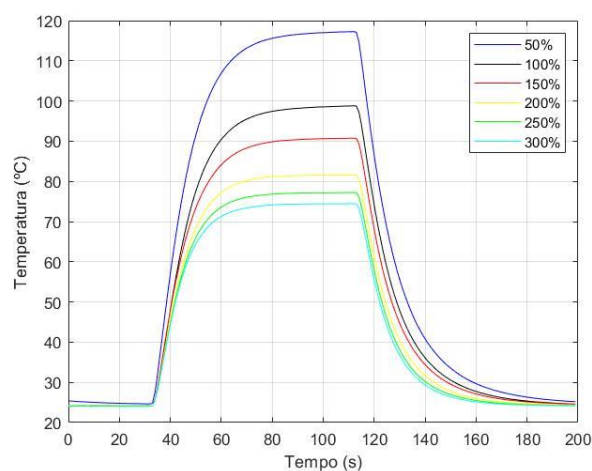
Amplitude (V)	0,18
Offset (V)	0,18
Duty Cycle (%)	40
Frequencia (Hz)	0,05
Fase (Rad)	-60

Fonte: Autoria Própria

4.3.1. Temperatura

Devido ao aumento de corrente passando pela amostra de LMF, a temperatura chegou a quase 120 °C, sob um comprimento de 13,5 mm, vide Figura 17. Sob influência da mesma corrente, a temperatura atingiu seu máximo, 74,4 °C, ao ser deformada em 300%.

Figura 17- Comportamento da temperatura ao longo do tempo

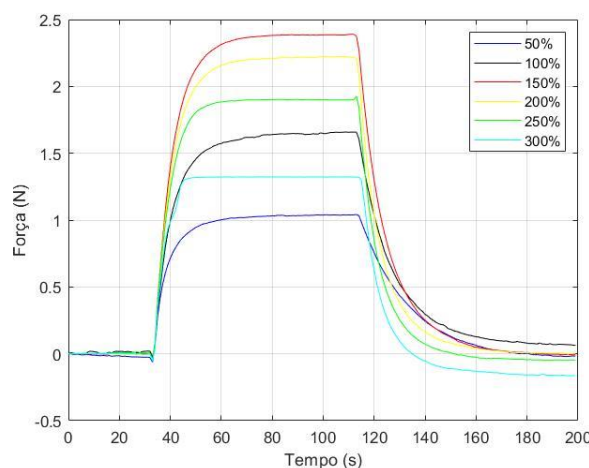


Fonte: Autoria Própria

4.3.2. Força

A Figura 18 apresenta a variação da força no decorrer do tempo, durante o processo de aquecimento e resfriamento da amostra de LMF. Devido a aplicação de corrente de 351 mA, sob um alongamento de 50%, resultou em uma variação de força de 1,03 N, isto representa uma força relativamente alta para tal alongação.

Figura 18 - Gráfico de Força ao longo do tempo sob 351 mA



Fonte: Autoria Própria

Seguindo o mesmo caminho dos testes anteriores, a força máxima ocorreu sob um alongamento de 150 %, que neste caso, sob influência de uma corrente de 351 mA, chegou a 2,4 N, e voltou a diminuir em comprimentos maiores, chegando a 1,33 N sob um alongamento de 300 %.

4.3.3. Força versus Temperatura

Atendendo que as amostras foram submetidas ao mesmo nível de corrente e variando o nível de alongamento, temos os resultados expostos na tabela seguinte. Pode-se notar que quanto menor é a distância entre os olhais da mola, maior é a temperatura, isto ocorre devido a transferência de calor ser mais eficiente quando a amostra é exposta a uma área maior de contato com o meio.

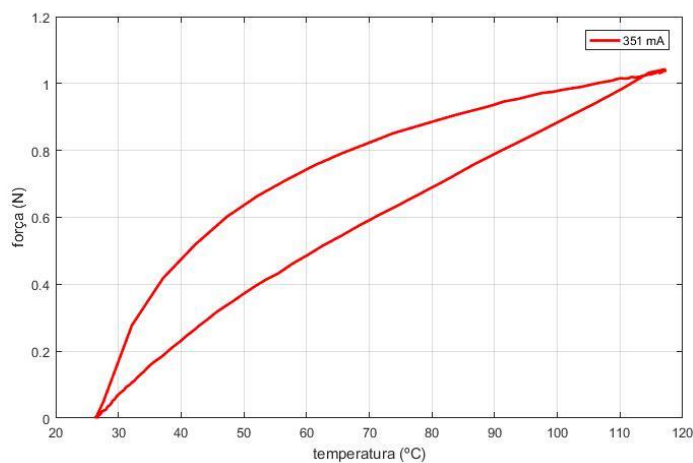
Tabela 7 - Dados relacionando Força, temperatura e alongamento da mola de LMF

Distância entre os olhais (%)	Força (N)	Temperatura (°C)
50	1,03	117,9
100	1,55	98,8
150	2,4	90,8
200	2,15	81,6
250	1,9	77,3
300	1,33	74,4

Fonte: Autoria Própria

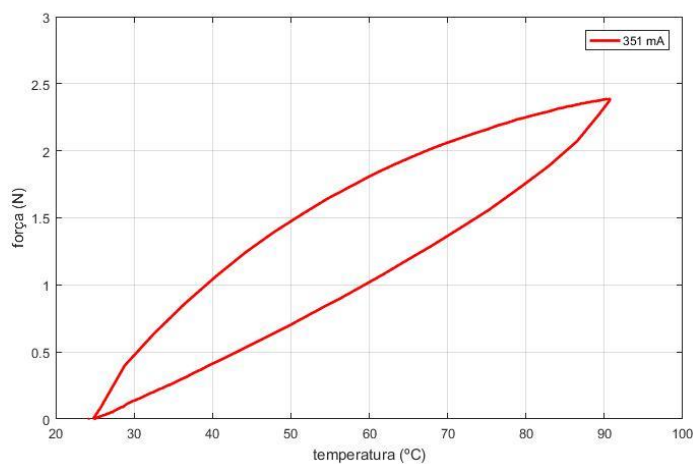
A força exercida pela micromola cresce até um alongamento de 150 %, e após este valor, estes valores de força começam a cair, como podemos observar nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Gráfico Força versus Temperatura sob alongação de 50 %



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 - Gráfico Força versus Temperatura sob alongação de 150%



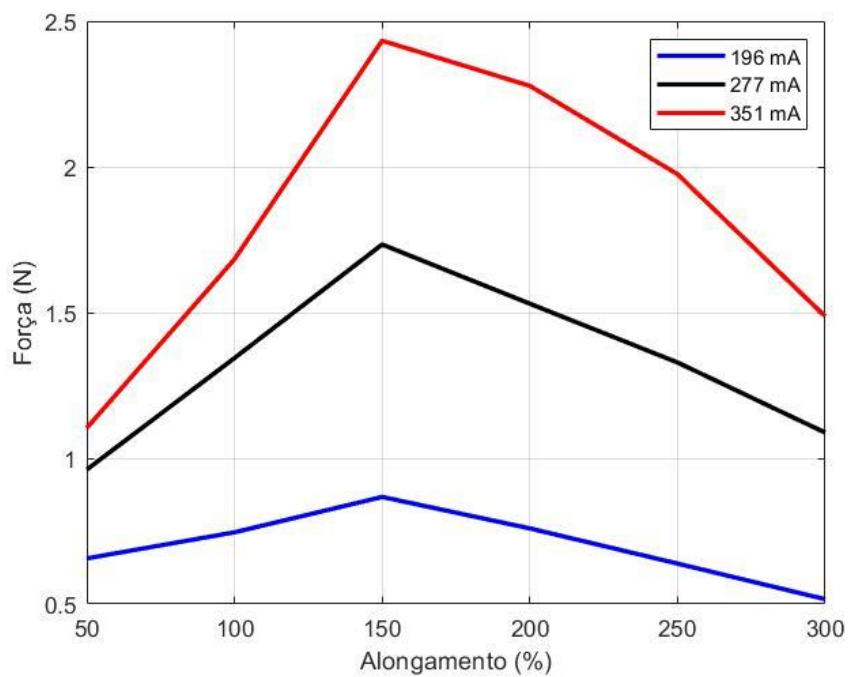
Fonte: Autoria Própria

4.4. Força versus Alongação

Devido as observações realizadas nos tópicos anteriores, pudemos observar que a amostra segue uma tendência em termos de força. Sabendo que a força residual da amostra aumenta com a

distância entre os olhais, como mostrado na Figura 21, podemos notar que ΔF diminui após um alongamento maior que 22,5 mm, ou seja, 150 %.

Figura 21 - Gráfico Força x alongamento sob os diferentes níveis de excitação elétrica



Fonte: Autoria Própria

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso realizou-se um estudo de caracterização em uma micromola de LMF através de ensaios termomecânicos. Foi apresentada uma revisão bibliográfica acerca dos principais tópicos abordados neste trabalho, e colocado em uso o protótipo da máquina de testes. A amostra utilizada em questão é alvo de diversos estudos e aplicações, como por exemplo motores termoeletricos, e aplicações em próteses como microatuadores. Através dos ensaios, foi possível obter dados de temperatura, força e o alongamento para análise e determinar os critérios de aplicação da amostra.

Sob excitação em diferentes amplitudes de corrente, foi observado que a temperatura da amostra tende a aumentar quanto maior for esta excitação. Mas, se a mola for esticada, a troca de calor com o meio acontece de forma mais eficiente e a temperatura tende a diminuir quanto maior for a distância entre os olhais. Sob influência de corrente elétrica em 351mA, a temperatura da amostra chega a cair em 30 % se esticarmos a amostra em 300 %.

Sabe-se que a amostra em questão é termicamente ativa, portanto ao aquecer a mola por passagem de corrente elétrica, a mesma tem sua temperatura elevada e inicia-se o processo de contração da mola, ou seja, a mola exerce uma força em resposta ao aquecimento devido a transformação de fase. A variação entre a força residual e a força durante a excitação, chegou a ter um aumento de 57 % devido a elongação. Sendo a variação de força foi de 0,7 N para uma corrente de 193 mA e 2,4 N para 351 mA, isso representa um aumento de 69 % em amplitude de força só devido ao aumento do nível de corrente elétrica.

Através dos gráficos força versus elongação, constatou-se um limite de alongamento para aumento de força. Em um alongamento de 150 %, a amostra exibiu seu maior ΔF , mas após isto, a variação de força já não conseguia atingir o valor ótimo como ocorreu em 150 %. Esta informação é corroborada pelo o que o fabricante orienta, na qual a amplitude de aplicação da micromola de 9 mm deve ser de 15 a 25 mm (MORELLI ORTONDONTIA). Saber a amplitude de alongamento de uma mola é de suma importância pois define o tipo de aplicação da micromola, e limita o alongamento da mesma num limite funcional.

Sabendo da importância da caracterização dos materiais com memória de forma, nosso interesse agora é realizar este tipo de atividade em outros modelos de LMF, como por exemplo, amostras em geometria não convencionais.

REFERÊNCIAS

ÖLANDER, A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. **Jornal of the American chemical society**, v. 54, p. 3785-4124, October 1932.

Unsupported source type (DocumentFromInternetSite) for source Mor18.

COURA, E. A. N. **Estudo da aplicação da liga NiTi com efeito memória de forma em atuadores de aeronaves**. UFMG. [S.l.]. 2016.

EMILIAVACA, A. **Smart Morphing Wing: um protótipo de asa adaptativa acionada por micromolas de liga com memória de forma**. Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba. 2016.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys Modelling and engineering Applications**. [S.l.]: Springer, 2008.

LAGOUDAS, D. C.; HARTI, D. J. Aerospace applications of shape memory alloys, v. 221, n. 4, p. 535-552, 2007.

MACHADO, L. G.; SAVI, M. A. Medical applications of shape memory alloys. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, Ribeirão Preto, v. 36, n. 6, p. 683-691, 2003.

MANTOVANI, D. Shape memory alloys: Properties and biomedical applications. **JOM** , v. 52, n. 10, p. 36-44, October 2000.

MK CONTROLE. Mk controle. **Mk controle**, 2018. Disponível em: <<http://www.mkcontrole.com.br/celulas-de-carga/140-celulas-de-carga-csa-zl>>. Acesso em: 17 Março 2018.

MORELLI ORTONDONTIA. Morelli Ortondontia. **Morelli Ortondontia**. Disponível em: <http://static.morelli.com.br/arquivos/midias/folhetos/br/Midia_119_4_1398793626093.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2018.

NIEMEYER, A. et al. Laser-machined shape memory alloy sensors for position feedback in active catheters. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 147, p. 83-92, 2008.

ÖLANDER, A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. **Jornal of the American chemical society**, v. 54, p. 3785-4124, October 1932.

OLIVEIRA, S. D. **Caracterização e desenvolvimento de um atuador de força utilizando material de memoria de forma**. PPGEM/Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2015.

OTSUKA, K.; REN, X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. **Progress in Materials Science**, v. 50, n. 5, p. 511-678.

RAO et al. **Design of shape memory alloy (sma) actuators**. [S.l.]: SpringerBriefs, 2015.

SALEHI, M. et al. Mechanical properties identification and design optimization of nitinol shape memory alloy microactuators. **Smart Materials and Structures**, v. 23, 2014.

SILVA, A. F. C. A. et al. Dedo robótico acionado por molas de liga com memória de forma. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 36, 2017.

STOECKEL, D. Shape memory actuators for automotive applications. **Materials & Design**, v. 11, n. 6, p. 302-307, 1990.

STOECKEL, D. Nitinol Medical Devices and Implants. **Min Invas Ther & Allied Technol**, v. 9, n. 2, p. 81-88, 2000.